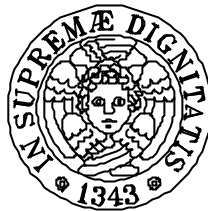


Università degli Studi di Pisa
Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea in Ingegneria Civile
Indirizzo Strutture



Tesi di Laurea

**“DIAGNOSI DEL DISSESTO DELLA
CHIESA DI SANTA MARIA FORISPORTAM IN LUCCA”**

Relatori:

Prof. Ing.
MARIA LUISA BECONCINI

Prof. Ing.
PIETRO CROCE

Dott. Ing.
PAOLO FORMICHI

Dott. Ing.
DANIELE PELLEGRINI

Candidata:

LETIZIA PAGLIAI

Anno Accademico 2008/2009

Ai miei genitori

INTRODUZIONE	1
CAPITOLO 1	
LA STORIA DELLA COSTRUZIONE.....	4
1 CHIESA PRIMITIVA E SUCCESSIVI AMPLIAMENTI	5
1.1 Premessa	5
1.2 La chiesa nel X secolo	6
1.3 La chiesa tra XI e XII secolo	8
1.4 La chiesa tra il XVI secolo ed oggi	11
1.5 Successivi lavori di restauro e conservazione.....	14
2 LA CHIESA OGGI	16
2.1 L'interno della chiesa.....	16
2.2 La facciata.....	18
2.3 L'abside	20
2.4 Il campanile	20
CAPITOLO 2	
LO STATO ATTUALE.....	22
1 MANIFESTAZIONI DI FATISCENZA E DISSESTO	22
2 LE INDAGINI CONOSCITIVE	25
3 IL RILIEVO	26
4 STUDIO GEOLOGICO-GEOTECNICO E MONITORAGGIO	29
4.1 Inquadramento geologico e idrogeologico	29
4.2 Cenni sulla sismicità dell'area	30
4.3 Campagna geognostica-geofisica	30
4.4 Stratigrafia di dettaglio e considerazioni geotecniche	33
5 MONITORAGGIO DELLE LESIONI E DEI FUORI PIOMBO	33
6 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE SUI RISULTATI DELLE INDAGINI GEOLOGICHE E DI MONITORAGGIO	38
7 VERIFICA STRATIGRAFICA MEDIANTE TOMOGRAFIA GEORADAR	39
7.1 Scopo dell'indagine	39
7.2 Risultati	40
8 INDAGINI NON DISTRUTTIVE.....	43
8.1 Applicazione della tecnica ultrasonica allo studio delle colonne fessurate	43
8.2 Indagini soniche	43
8.3 Prova con martinetto doppio per la determinazione delle caratteristiche tenso-deformative della muratura.....	48
8.4 Prove e analisi di laboratorio su campioni di muratura	50
8.4.1 Prove sui mattoni	50
8.4.2 Analisi delle malte.....	54
8.4.3 Prove di compressione su tre prismi di muratura.....	54

CAPITOLO 3

LA PARETE NORD DELLA NAVATA CENTRALE57

- 1 RILIEVO DELLA GEOMETRIA E DEL QUADRO FESSURATIVO DELLA PARETE..... 58

CAPITOLO 4

STUDIO DELLA PARETE: ANALISI LINEARE66

- 1 LA MODELLAZIONE NUMERICA DELLE MURATURE 66
- 2 MODELLAZIONE DELLA PARETE OGGETTO DI STUDIO 67
- 3 ANALISI DEI CARICHI..... 70
 - 3.1 *Tetto della navata centrale*..... 70
 - 3.2 *Tetto della navata laterale* 72
 - 3.3 *Volte a crociera della navata centrale*..... 73
 - 3.4 *Cedimenti*..... 76
- 4 COMBINAZIONI DI CARICO 77
- 5 RISULTATI..... 78
 - 5.1 *Risultati dell'analisi per i carichi permanenti (COMB1)* 80
 - 5.2 *Risultati dell'analisi per i cedimenti dei capitelli (dalla COMB2 alla COMB8)*..... 94
- 6 ANALISI DEI RISULTATI 131
 - 6.1 *Modello soggetto ai carichi permanenti (COMB1)* 131
 - 6.2 *Modello soggetto ai carichi permanenti e ai cedimenti dei capitelli (dalla COMB2 alla COMB8)* 132

CAPITOLO 5

STUDIO DELLA PARETE: ANALISI NON LINEARE133

- 1 MODELLAZIONE DELLA PARETE OGGETTO DI STUDIO 133
- 2 RISULTATI..... 137
- 3 ANALISI DEI RISULTATI..... 139

CAPITOLO 6

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE141

- 1 ANALISI CONSUNTIVA DEI RISULTATI..... 141
- 2 SVILUPPI FUTURI 142

CONCLUSIONI.....143

APPENDICE A

ANALISI LINEARE: VALORI DELLE TENSIONI PRINCIPALI MASSIME NEGLI SHELL ATTRAVERSATI DALLE LESIONI.....146

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....173

INTRODUZIONE

La Chiesa di Santa Maria Forisportam è uno dei monumenti più antichi ed importanti della città di Lucca. La costruzione primitiva risale al secolo VIII; da allora, fino al XVI secolo, ha subito successivi ampliamenti che ne hanno modificato profondamente le dimensioni e la tipologia, fino ad assumere l'aspetto che oggi possiamo ammirare.

Attualmente, la chiesa di S. Maria Forisportam presenta un quadro alquanto complesso di manifestazioni di fatiscenza e dissesto, che, in più fasi, ha reso necessaria l'esecuzione di interventi locali di riparazione: in particolare sono stati eseguiti interventi mirati a risolvere situazioni critiche riscontrate sull'arco trionfale, sulla cupola e sulle volte a crociera della navata centrale. In alcune zone sono inoltre presenti opere provvisorie di sostegno.

Considerando la situazione globale di degrado, è apparso chiaro che si dovesse procedere ad una seria valutazione delle cause dei dissesti che interessano la costruzione, sulla base della quale impostare la progettazione di un piano di interventi di consolidamento tesi ad eliminare le cause oltre che a riparare gli elementi danneggiati.

A questo scopo, è stata avviata una campagna di indagini conoscitive della costruzione e di monitoraggio dell'evoluzione del degrado; si sono effettuate analisi sperimentali per accertare la natura del terreno e la tipologia delle fondazioni, in modo da poter individuare eventuali cause di cedimenti fondali; sono state inoltre eseguite prove di caratterizzazione delle murature, per valutarne i parametri del comportamento meccanico, e misure su alcune colonne di marmo della navata centrale per determinare l'estensione in profondità delle fessure. Parallelamente, è

stato avviato il monitoraggio dell'ampiezza di alcune delle lesioni presenti nelle pareti murarie e dell'inclinazione di alcune colonne.

Il presente lavoro si è inserito nell'ambito del programma di studi, dapprima effettuando un inquadramento generale dei dissesti presenti nella chiesa di S. Maria Forisportam, sia utilizzando i risultati delle indagini sopra citate, sia interpretando da un punto di vista meccanico il quadro fessurativo e di deformazioni osservato.

Le indagini globali hanno evidenziato lo stato particolarmente dissestato della parete della navata centrale situata sul lato nord della chiesa; tale parete presenta infatti un vasto quadro di lesioni di lunghezza ed ampiezza notevoli ed in alcune zone vistosi scorrimenti dei conci di pietra che formano gli archi. Si è pertanto ritenuto interessante studiare la situazione statica della parete al fine di individuare le probabili cause che hanno prodotto il quadro di dissesti rilevato. Ci si è quindi proposti di sondare, mediante un raffinato modello matematico, l'effetto sia dei soli carichi permanenti che interessano la struttura, sia di ipotetici cedimenti delle colonne di imposta, fino a pervenire ad un quadro di lesioni simile a quello esistente.

Da considerazioni generali sulla situazione statica delle strutture, si è osservato che la parete della navata centrale poteva essere analizzata separatamente dal resto della costruzione. Infatti, la parete, presentando un quadro di spostamenti e deformazioni nel suo piano medio, non appare gravata dalle spinte delle coperture delle navate ma solo dal peso di queste ultime; inoltre, le strutture con cui la parete è collegata alle due estremità, la parete di facciata a ovest e l'arcone del transetto ad est, risultano molto deformabili, e quindi non in grado di costituire un efficace ritegno.

Il modello geometrico della parete è stato ottenuto dal rilievo effettuato con il laser scanner 3D, che ha permesso di determinare la reale geometria della parete, nonché la tessitura delle murature ed il quadro fessurativo. Il comportamento meccanico delle murature è stato dedotto dai risultati dell'importante campagna conoscitiva condotta sui materiali.

Sul modello è stata dapprima eseguita un'analisi in campo lineare degli effetti prodotti dai carichi verticali costituiti dai pesi propri e delle coperture che gravano sulla parete. Poiché i risultati, in termini di stato tensionale, non giustificavano appieno il quadro fessurativo, si sono condotte ulteriori analisi introducendo nel modello cedimenti dei vincoli alle imposte degli archi.

Infine, per tener conto dell'alterazione del quadro tensionale prodotta dall'apertura delle lesioni, si è condotta l'analisi in campo non lineare della parete soggetta ai soli carichi permanenti.